

УДК 622.011.43

А. К. Рысбаева, кандидат технических наук, ассоциированный профессор
 Казахская головная архитектурно-строительная академия
Н. К. Молдакунова, старший преподаватель
 Иссык-Кульский государственный университет имени К. Тыныстанова, Кыргызстан, г. Каракол
А. С. Маханова, преподаватель
Р. Б. Баймахан, доктор технических наук, профессор
 Казахский государственный женский педагогический университет

НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ СЕЛЕЗАЩИТНОЙ ПЛОТИНЫ НАКЛОННО-СЛОИСТОГО СТРОЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

В данной статье рассматриваются вопросы разработки новой высокопрочной конструкции селезащитной плотины, которая основана на применении обычных местных геоматериалов типа грунт, пески, камни, щебень, раздробленные различного рода горные породы и т. д. в сочетании с геосинтетическими материалами, которая возводится наклонными слоями.

В работе предложена технология ее возведения трапецевидной в поперечном сечении плотины наклонными слоями из геосинтетиков и расчетная модель исследования напряженно-деформированного состояния такой среды сложного неоднородного, наклонно-слоистого анизотропного строения. Анализами результатов исследований доказываем, что предлагаемая конструкция плотины, возводимая неоднородными наклонными слоями с включениями геосинтетических материалов, является намного устойчивее на деформацию осадков по сравнению с имеющимися конструкциями, традиционно возводимыми горизонтальными слоями.

Ключевые слова: анизотропия, грунт, метод, расчет, плотина.

Введение

Хроника катастроф. Начиная с 2010 года резко активизировались водные стихии как в других странах, так в том числе и в Казахстане, начавшиеся в последние годы с южных областей и почти охватившие всю обширную территорию Казахстана. Селевые потоки, возникающие в результате оползней, наносят большой ущерб народному хозяйству и населению во многих регионах республики. Наиболее оползневыми и селеопасными районами являются территории Северного Тянь-Шаня.

Сель, разрушив плотину, потопила село Кокпекты в Карагандинской области, в результате стихии погибло 5 человек.

11 марта 2010 г. в селе Кызыл-Агаш Аксуского района Алматинской области в результате прорыва плотины произошло крупное наводнение. С целью надежной охраны населенных пунктов на пути ожидаемых грозных селевых потоков в свое время были построены 3 плотины в трех местах. К сожалению, все они были разрушены как спичечные коробки, и погибло уже 45 человек [1].

Департамент по чрезвычайным ситуациям о возможности наступления селя по руслам горных рек близ города Алматы часто предупреждает. Но не известно, где и когда. Часто приводится река Талгар, по которой не один раз проходил селевой поток за последние годы. В 2015 году 23 июля сель прошла внезапно по реке Каргалинка и сразу затопила дома 3 районов из 7 по городу Алматы. В этом году (2016) вышли за берега потоки воды в центре Алматы на реке Есентай. Это только начало непредсказуемых угроз селевых потоков, так как быстро наполняются неисчислимые озера, расположенные высоко в горах, участвовавшие как в результате ливневых дождей, так и темпом таяния ледников вечной мерзлоты. Поэтому угроза селевого потока для города Алматы с катастрофическими последствиями все еще остается од-

ной из вечных проблем, как и ожидаемые сильные землетрясения. По мнению ученых-экспертов, емкость плотины в бассейне р. Узункаргалы почти в 32 раза меньше необходимой! В бассейне реки Каскелен – в 6,5 раза, в бассейне реки Малая Алматинка – в 2,5 раза, в бассейне реки Талгар – в 6 раз, а в бассейне реки Есик – в 7,5 раза [2]. Такие данные сами по себе говорят о бессилии существующих плотин устаревшей конструкции.

В табл. 1 приведены краткие данные об ужасных последствиях, произошедших по причине разрушения противоселевых защитных плотин в мире.

Таблица 1. Сведения о крупных разрушениях плотин [3]

Дата	Плотина	Место	Число погибших
12 марта 1928 г.	Плотина Сент-Френсис	Каньон Сан-Францискито, береговые склоны	Около 600 человек
18 августа 1941 г. Осень 1943 г.	Днепрогэс	Запорожье, СССР	Несколько тысяч человек
2 декабря 1959 г.	Плотина Мальпассе	Лазурный берег, Франция	423 человека
9 октября 1963 г.	Плотина Вайонт	Монте Ток, Беллуно, Италия	2500 человек
7 августа 1975 г.	Плотина Баньяо	Чжумадянь, Китай	171 тысяча человек

Цель. Разработать новую высокопрочную конструкцию селезащитной плотины на основе комбинированного применения местных геоматериалов в сочетании с геосинтетическими материалами и предложить способ ее возведения наклонными слоями. А также доказать ее прочность научными исследованиями, созданием расчетной геомеханической модели наклонно слоистой среды, моделированием ко-

нечными элементами и проведением многовариантных расчетов.

Задача. Разработать новую конструкцию горной селезащитной плотины на основе применения местных геоматериалов, таких как камни, пески и любые природные материалы из грунтов и горных пород, в сочетании с современными высокопрочными геосинтетическими материалами. Предложить способ возведения такой плотины наклонными слоями. Доказать прочность плотины такой конструкции проведением расчетов по определению напряженно-деформированного состояния.

Проанализировать поля величин деформации для всевозможных вариантов угла заложения наклонных слоев. Результатами исследования и анализов доказать высокую прочность предложенной конструкции плотины по сравнению с имеющимися конструкциями.

Механическая модель сечения плотины

Для моделирования поперечного плоского сечения по форме трапецевидной плотины запишем Закон Гука сначала для горизонтальной слоистости, применяя модель наклонно слоистого горного массива Ж. С. Ержанова, Ш. М. Айталиева, Ж. К. Масанова (при угле наклона $\varphi = 0$) [4] для компонентов напряжений, который имеет вид:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= c_{11}\varepsilon_x + c_{13}\varepsilon_z + c_{15}\gamma_{xz}, \\ \sigma_z &= c_{31}\varepsilon_x + c_{33}\varepsilon_z + c_{35}\gamma_{xz}, \\ \tau_{xz} &= c_{51}\varepsilon_x + c_{53}\varepsilon_z + c_{55}\gamma_{xz}\end{aligned}\quad (1)$$

и содержит 5 независимых коэффициентов.

Составим матрицу анизотропной упругости $[D]$:

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ d_{12} & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

элементы которой состоят из коэффициентов (1):

$$\begin{aligned}d_{11} &= c_{11}c_3 + 2(c_{13} + 2c_{44})c_6 + c_{33}c_4, \\ d_{12} &= c_{13} + (c_{11} + c_{33} - 2c_{13} - 4c_{44})c_6, \\ d_{13} &= (c_{11}c_1 - c_{33}c_2 - (c_{11} + 2c_{44})\cos 2\varphi)c_5, \\ d_{22} &= c_{11}c_4 + 2(c_{13} + 2c_{44})c_6 + c_{33}c_3, \\ d_{23} &= (c_{11}c_2 - c_{33}c_1 + (c_{13} + 2c_{44})\cos 2\varphi)c_5, \\ d_{33} &= c_{44} + (c_{11} + c_{33} - 2(c_{13} + 2c_{44}))c_6.\end{aligned}\quad (3)$$

где

$$\begin{aligned}c_1 &= \cos^2 \varphi, \quad c_2 = \sin^2 \varphi, \quad c_3 = \cos^4 \varphi, \\ c_4 &= \sin^4 \varphi, \quad c_5 = \sin \varphi \cos \varphi, \\ c_6 &= \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi.\end{aligned}\quad (4)$$

$$c_0 = (1 + \nu_1)(n(1 - \nu_1) - 2\nu_2^2),$$

$$c_{11} = c_{22} = (E_1(n - \nu_2^2)) / c_0,$$

$$c_{13} = (\nu_2 E_1) / (n(1 - \nu_1) - 2\nu_2^2), \quad (5)$$

$$c_{33} = ((1 - \nu_1)E_1) / (n(1 - \nu_1) - 2\nu_2^2),$$

$$c_{55} = G_2.$$

Подставляя значения выражений c_1, \dots, c_6 из (5) с учетом (4) в (3), получим

$$d_{11} = c_{11} \cos^4(\varphi) + c_{33} \sin^4(\varphi) + 2(c_{13} + 2c_{44}) \sin^2(\varphi) \cos^2(\varphi),$$

$$d_{12} = c_{13} + (c_{11} + c_{33} - 2(c_{13} + 2c_{44})) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi,$$

$$d_{13} = (c_{11}c_1 - c_{33}c_2 - (c_{13} + 2c_{44}) \cos 2\varphi) \sin \varphi \cos \varphi,$$

$$d_{22} = c_{11} \sin^4(\varphi) + 2(c_{13} + 2c_{44}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + c_{33} \cos^4 \varphi, \quad (6)$$

$$d_{23} = (c_{11} \sin^2 \varphi - c_{33} \cos^2 \varphi + (c_{13} + 2c_{44}) \cos 2\varphi) \sin \varphi \cos \varphi,$$

$$d_{33} = c_{44} + (c_{11} + c_{33} - 2(c_{13} + 2c_{44})) \cos^2(\varphi) \sin^2(\varphi).$$

В отличие от горизонтальной слоистости элементы матрицы упругости D в случае наклонно слоистого строения будут полностью заполненными, то есть нулевых элементов не будет. Количество независимых коэффициентов станет равно 6.

Вывод формулы силы удара селевого потока

На плотину будет действовать сила от собственного гравитационного веса $F^{гп}$, направленная вертикально вниз, и ударная сила грязекаменного селевого потока $F^{сел}$, которые вычисляются выражением

$$\{F^{гп}\} = \gamma \{H\}, \quad (7)$$

где γ – объемный вес массы плотины; H – высота расчетных узлов относительно основания расчетной области.

$$\{F^{сел}\} = \alpha^{ополз} m^{ополз} v^{ополз} \left\{ \cos \left(k \hat{x} \right) \right\}, \quad (8)$$

где $\alpha^{ополз} = \frac{1}{\Delta t_j} \sim \frac{1}{\text{сек}}$, коэффициент пропорциональ-

ности; $\Delta t_j = \frac{t^{ополз}}{n}$ – время действия импульсного

удара оползневой массы грязекаменного селевого потока; $t^{ополз}$ – продолжительность удара на поверхность плотины; n – количество ударов; $m^{ополз}$ – объемная масса потока; $v^{ополз}$ – скорость течения;

$\left\{ \cos \left(k \hat{x} \right) \right\}$ – вектор, длина которого определяется

количеством q расчетных узловых точек на ударяемой поверхности; $k \hat{x}$ – угол между нормалью k потока и горизонтальной осью Ox прямоугольной системы координат xOz .

С учетом этих сил мы можем записать единую систему алгебраических уравнений равновесия в конечноэлементном представлении в следующем виде:

$$[R]\{U\} = \{F^{гп}\} + \{F^{сел}\}. \quad (9)$$

Предлагаемая конструкция селезащитной плотины

Предлагаемая новая конструкция такой селезащитной плотины основана на возведении наклонными слоями из местных геоматериалов, состоящими

из обычных мелких каменистых и щебенистых грунтов любого природного состава в сочетании с геосинтетическими материалами, она показана на рис. 3, а и б.

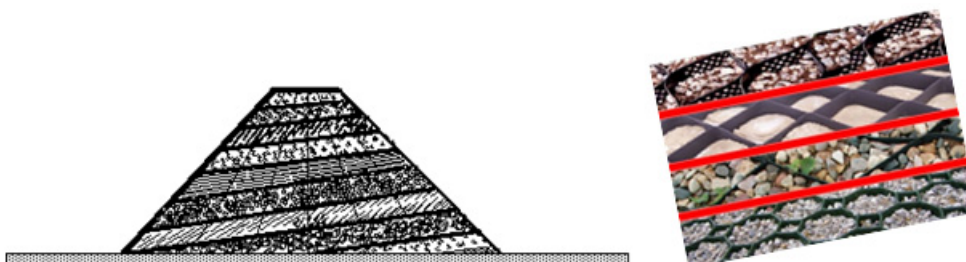


Рис. 3. Конструкция плотины наклонно-слоистого строения: а – общий вид поперечного сечения; б – увеличенные слои

Каждый слой возводится под углом и каждый из них имеет вид, показанный на рис. 3, б.

Высокопрочные геосинтетические решетки заполняются местными материалами. Между слоями подстилаются геосинтетические материалы высокой прочности. На рисунке они показаны красным цветом. Сейчас уже появились такие геосинтетики, которые прочнее бетона по механическим свойствам. Такие материалы с указанными свойствами производятся английской строительной фирмой [5].

Алгоритмы решения МКЭ

Приведем основной алгоритм конечноэлементного решения задачи по работе [6]. Основное разрешающее уравнение МКЭ имеет вид

$$[R]\{U\} = \{P\} + \{F\}, \quad (10)$$

где $[R]$ – матрица жесткости системы; $\{U\}$ – вектор перемещений узловых точек; $\{P\}$ и $\{F\}$ – векторы геостатических и тектонических нагрузок. Алгоритмы практического применения тектонических сил описаны в работах [7, 8]. Компоненты тензора деформации и напряжений вычисляются внутри каждого изопараметрического элемента в гауссовых точках интегрирования i, j с помощью следующих выражений:

$$\{\varepsilon_{ij}\} = [B]_{i,j}\{U\}, \quad (11)$$

$$\{\sigma_{ij}\} = [D]\{\varepsilon_{ij}\}, \quad (12)$$

где $\{\varepsilon_{ij}\}^T = \{\varepsilon_x, \varepsilon_z, \gamma_{xz}\}$, $\{U_{ij}\}^T = \{u_{ij}, \vartheta_{ij}, \dots\}$, $\{\sigma_{ij}\}^T = \{\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}\}$, $[B]$ – матрица базисных функций и $[D]$ – матрица упругих характеристик. Для более точного вычисления значений компонентов напряжений внутри каждого элемента взято по 9 точек интегрирования ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$). Затем они экстраполированы ближайшим к контуру точкам.

Угол наклона плоскости изотропии менялся от нуля $\varphi = 0$ – горизонтальная слоистость до $\varphi = 90^\circ$ – вертикальная слоистость. Рассматривались случаи: $\varphi = 0, 15, 30, 45, 60, 75$ и 90° . Геометрические размеры: высота плотины – 50 м, ширина гребня – 20 м,

ширина по основанию – 100 м, ширина скального основания – 500 м, высота основания – 160 м. Приведенные к анизотропии физико-механические свойства материала плотины – мелкослоистого песчаника: модули Юнга – $E_1 = 1,074 \cdot 10^4$ МПа, $E_2 = 0,523 \cdot 10^4$ МПа, модуль сдвига – $G_2 = 0,12 \cdot 10^4$ МПа, коэффициенты Пуассона: $\nu_1 = 0,413$, $\nu_2 = 0,198$, объемный вес – $\gamma = 2,3 \cdot 10^2$ Мн/м³. Свойства геотекстиля-эпокси акрилата: модуль Юнга – $0,494 \cdot 10^4$, коэффициенти Пуассона – $\nu = 0,34$, объемный вес – $\gamma = 1,65 \cdot 10^2$ Мн/м³. Прочность на сжатие – 58,4 МПа, прочность на растяжение – 14,5 МПа.

Задача решена методом конечных элементов, алгоритмы которого описаны в работах [9 и 10]. Область разбита на 29256 изопараметрических конечных элементов. Общее количество узлов – 30003. Количество решений системы алгебраических уравнений за вычетом закрепленных граничных узлов – 58861.

Результаты и анализы

Результаты расчетов по определению деформированных состояний приведены ниже на рис. 4, а–з.

При горизонтальной слоистости $\varphi = 0$ плотина вместе с упругим скальным основанием деформируется вниз, то есть симметрично. Максимальное значение принимает верхняя гребенная часть по сравнению с величиной деформации контактной плоскости со скальным основанием (рис. 4, а).

При угле наклона плоскости изотропии $\varphi = 10^\circ$ плотина деформируется вниз почти в два раза меньше по сравнению с горизонтальной слоистостью. Правая угловая часть смещается больше, чем левая. Значения вертикальных и горизонтальных компонент перемещений равны: $V = 1,37$ м, $U = +0,20$ м. Область гребня слегка деформируется вправо. Область основания деформируется наоборот, величина смещений правой части меньше по сравнению с левой (рис. 4, б). Почти такая же картина наблюдается и при $\varphi = 20^\circ$ (рис. 4, в). Здесь вертикальная составляющая перемещений значительно уменьшается.

С увеличением угла наклона до $\varphi = 30^\circ$ еще сильнее уменьшается величина деформации в вертикальном направлении. Вся правая часть плотины вместе с основанием сильно деформируется вниз и вправо (рис. 4, *з*). Компоненты смещений правого угла гребенной области равны: $V = -0,57$ м, $U = +0,42$ м. При $\varphi = 45^\circ$ наблюдается эффект вращения со смещением вправо (рис. 4, *д*). Но величины деформации значительно уменьшаются по сравнению с предыдущим вариантом. В этом варианте впервые в области гребня преобладает величина горизонтальной компоненты перемещений U по сравнению с вертикальной компонентой V .

Вращение со смещением вправо остается. Но величины деформации значительно уменьшаются по сравнению с предыдущим вариантом. В этом варианте впервые в области гребня преобладает величина горизонтальной компоненты перемещений U по сравнению с вертикальной компонентой V .

При достижении угла наклона $\varphi = 60^\circ$ снова максимально смещается правая угловая точка гребня (рис. 4, *е*): $V = 0,11$ м, $U = +0,14$ м. Величины деформации в целом сильно уменьшаются по сравнению с предыдущими вариантами. Левая часть оснований вдали от угла заложения остается недеформированной. И здесь остается преобладание горизонтальной компоненты перемещений по сравнению с вертикальной компонентой.

Если угол наклона станет еще круче ($\varphi = 75^\circ$), то и в этот раз наблюдается максимальное смещение правой угловой точки гребня: $V = 0,05$ м, $U = +0,05$ м. Плотина вместе с основанием деформируется целиком вниз. Величины смещений незначительные (рис. 4, *ж*). И наконец, при вертикальной слоистости – $\varphi = 90^\circ$ плотина вместе с основанием деформируется вниз симметрично центральной вертикальной оси (рис. 4, *з*). Но значения компонентов перемещений самые наименьшие по сравнению со всеми предыдущими вариантами расчетов.

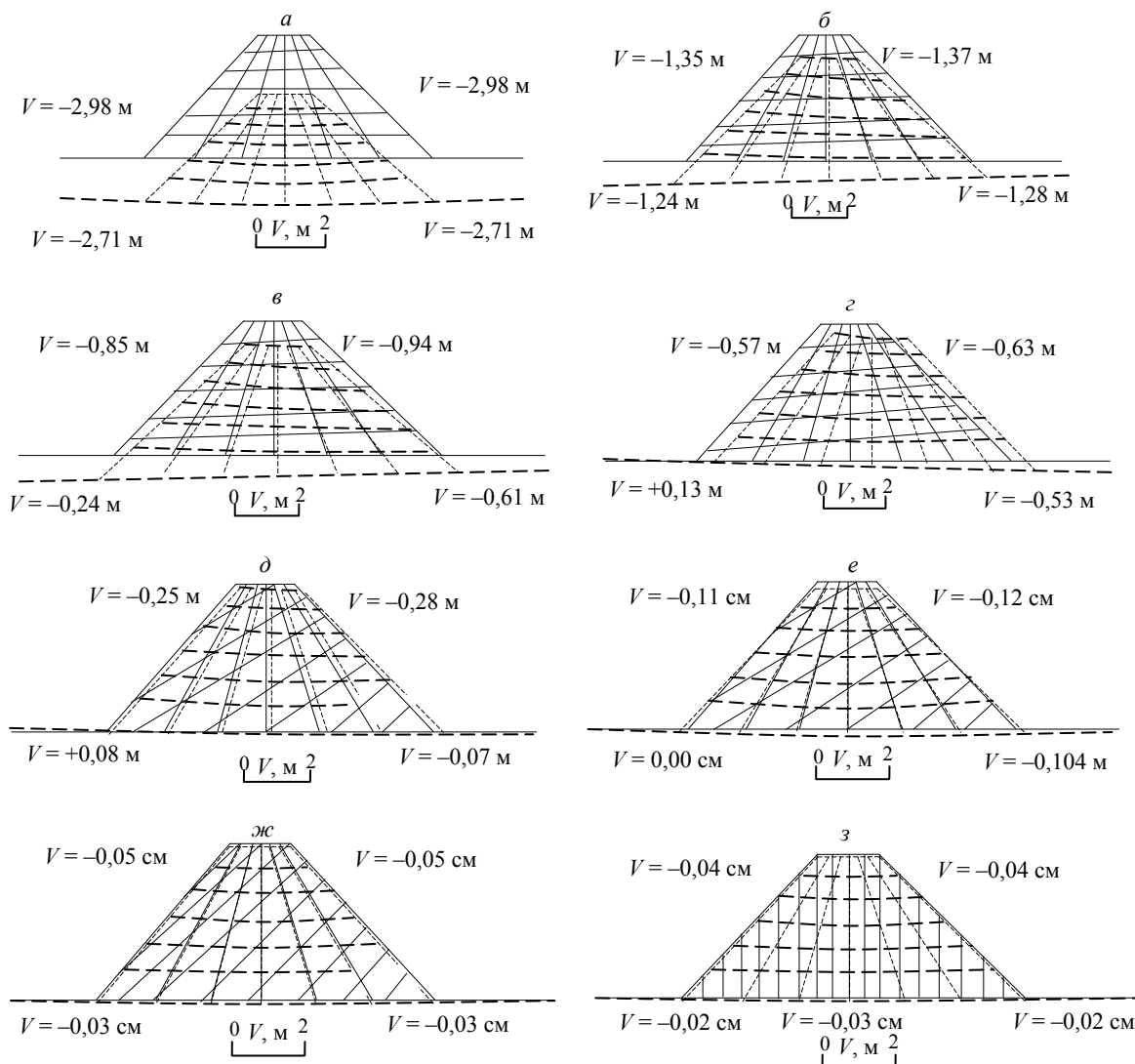


Рис. 4. Формы и величины упругой деформации плотины при различных углах заложения анизотропных слоев от горизонтальной ($\varphi = 0$) до вертикальной ($\varphi = 90^\circ$) слоистости

Заключение

Анализ результатов проведенных всевозможных вариантов расчетов позволяет сделать следующий важный вывод. Чем больше угол наклона плоскости слоев в теле плотины, тем меньше величины деформации осадков. Например, деформация при угле $\varphi = 45^\circ$ уменьшается в 12 раза по сравнению с традиционной горизонтальной слоистостью, применяемой тысячелетиями. Если возводить плотину вертикальными слоями, т. е. если $\varphi = 90^\circ$, то в этом случае величины вертикальной составляющей перемещений уменьшаются по сравнению с горизонтальными слоями на два порядка.

Таким образом, если возводить плотину наклонными слоями, то чем больше угол наклона плоскости изотропии, тем меньше становится значения вертикальной деформации осадков плотины вместе с основанием.

Библиографические ссылки

1. Baimakhan A. R., Salgarayeva G. I., Rysbayeva A. R., Seinasinova A. A., Baimakhan R. B. Deformation stability of a dam of tilt anisotropic structure. (Proceedings The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Extended Abstracts P.573. Fukuoka, Japan. 2015. Disk: P. 573–576.

2. Рысбаева А. К. Разработка анизотропной модели строения селезащитных грунтовых плотин и обоснование инновационной технологии ее возведения : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Бишкек, 2014. – 22 с.

3. Там же.

4. Ержанов Ж. С., Айталиев Ш. М., Масанов Ж. К. Устойчивость горизонтальных выработок в наклонно-слоистом массиве. – Алма-Ата, 1971. – 160 с.

5. BIT United Ltd. England. 2007-2014. – URL: WWW.bitunited.ru84.

6. Баймахан Р. Б. Расчет сейсмонапряженного состояния подземных сооружений в неоднородной толще методом конечных элементов : монография / под ред. академика Ш. М. Айталиева. – Алматы, 2002. – 232 с.

7. Баймахан А. Р. Оценка имеющихся исследований состояния слабосвязанных пород и грунтов оснований инженерных сооружений // Актуальные вопросы естественно-научных дисциплин : матер. Междунар. науч.-метод. конф. – Международная образовательная корпорация, КазГАСА, 2013. – С. 20–23.

8. Рысбаева Г. П. Закономерности трещинообразования на контуре подземного сооружения в анизотропном массиве : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Алматы, 2010. – 22 с.

9. Там же.

10. Сейнасинова А. А. Напряженное состояние слабосвязанного массива в окрестности подземной выработки с учетом естественных и искусственных неоднородностей : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Алматы, 2010. – 21 с.

A. K. Rysbayeva, PhD in Engineering, Associate Professor, Kazakh Head Architecture and Construction Academy

N. K. Moldakunova, Senior Lecturer, Issyk-Kul State University n.a. K. Tynystanov, Kyrgyzstan

A. S. Makhanova, Teacher, Kazakh State Women's Pedagogical University

R. B. Baymakhan, DSc in Engineering, Professor, Kazakh State Women's Pedagogical University

New Design of the Mud Dam of the Oblique Layered Structure and Research of its Deformation Durability

The paper considers the questions of developing a new high-strength mud dam which is built as an oblique layered structure based on applying usual local geologic materials like soil, sand, stones, breakstones, different shattered rocks and so on in combination with geosynthetic materials. The paper also presents a technology for constructing a trapezoid dam in cross section by oblique layers using geosynthetic materials, and a calculation model of investigating the stress-strain state of this complex non-homogeneous oblique layered anisotropic construction. Analysis of investigation results shows that the proposed design of the dam constructed as non-homogeneous oblique layers with inclusions of geosynthetic materials is much more stable for sediment deformation as compared with the available structures built traditionally as horizontal layers.

Keywords: anisotropy, soil, method, calculation, dam.

Получено: 29.05.16